

Kutatómunka a Műanyag- és Gumiipari Laboratóriumban

KONCZ Medárd,^{a,b} TÁTRAALJAI Dóra^{a,b*} és PUKÁNSZKY Béla^{a,b}

^a Műanyag- és Gumiipari Laboratórium, Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műgyetem rkp. 3., 1111 Budapest, Magyarország

^b Polimer Kémiai és Fizikai Kutatócsoport, Anyag- és Környezetkémiai Intézet, Természettudományi Kutatóközpont, Magyar Kutatási Hálózat, Magyar Tudósok Körútja 2., 1117 Budapest, Magyarország

1. Bevezetés

A fogyasztói igények kiszolgálása a műanyagipart az elmúlt 20 évben vezető iparággá tette, ezért a globális szinten jelentkező problémák erre az iparágra is nagymértékben kihatnak. Ilyen probléma a fosszilis energiahordozók fogyása és az óriási méreteket öltő környezetszennyezés, amely egész bolygónkra káros hatással van. A műanyagipar felé különösen erős az elvárás, hogy a fenntarthatóság elvét követve minél nagyobb mértékben megújuló energiaforrásokat használjon alapanyagként, és adjon megoldást a műanyag hulladék hibás kezelésének problémájára. Egyre nagyobb az aggály a környezetbe, az élővilágba és nem utolsósorban az emberi szervezetbe kerülő mikroműanyagokkal kapcsolatban. Népszerű, sőt sok alkalmazási területen előírás a műanyagok helyettesítése más anyagokkal, sokszor akkor is, ha az alkalmazott új anyag a használat szempontjából nem praktikus. A mai társadalom életmódjában olyan nagymértékben beépült a műanyagok használata, hogy elképzelhetetlen teljes mértékű helyettesítésük, azonban a tudatos hozzáállás mindenképpen elengedhetetlen a műanyagok alkalmazása során.

A Műanyag- és Gumiipari Laboratórium (MGL) a Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék egyik csoportja, amely elsősorban a műanyagok előállításával, feldolgozásával, jellemzésével és alkalmazásával kapcsolatban oktatja a BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Karának hallgatóit, szakképzett műanyagipari mérnököket képezve. Az oktatási tevékenység mellett évtizedek óta magas színvonalú alap- és alkalmazott kutatás zajlik a csoportban (ld. **1. ábra**), amelynek a fókuszában az utóbbi 10 évben a fent említett problémák és aggályok állnak. Laboratóriumunk szorosan együttműködik a HUN-REN Természettudományi Központ Polimer Kémiai és Fizikai Kutatócsoportjával. Munkánk fontos részét képezi az együttműködés hazai és nemzetközi ipari vállalatokkal, amely során konkrét ipari problémák megoldásán dolgozunk.

Bár fejlesztéssel nem tudjuk elérni azt, hogy az emberek, a nagyvállalatok és az állami szervezetek a műanyag hulladékot felelősen kezeljék, az utóbbi évtizedben laboratóriumunkban is meghatározóvá vált az olyan anyagok és megoldások kutatása és fejlesztése, amelyek beilleszthetők a körforgásos gazdaságba, mint például a műanyagok ké-

miai újrahasznosítása, illetve új stabilizátorok fejlesztése. Ezentúl számos kutatásunk foglalkozik természetes eredetű, illetve biológiailag lebomló polimer alapanyagokkal, adalékanyagokkal, illetve társítóanyagokkal.



1. Ábra. Kutatómunka az MGL-en.

2. A társított rendszerek szerkezet tulajdonság összefüggései

Új műanyag kifejlesztésének gazdaságos és gyors módja egy, már létező polimer módosítása töltőanyag hozzáadásával (kompozit képzés), illetve egy másik polimer hozzáadásával (keverék készítés). Így a hagyományos tömegműanyagok átalakításával is a műszaki műanyagok mechanikai tulajdonságaival vetekedő minőségű új anyagot kaphatunk. Több, gyakorlati szempontból is fontos szálerezített műanyag kompozit széleskörű jellemzését végeztük el, hogy jobban megértsük az anyag tulajdonságait meghatározó legfontosabb tényezőket¹. Többkomponensű rendszerekben elengedhetetlen az anyagban lejátszódó lokális deformációs folyamatok ismerete, mivel ezek alapvetően határozzák meg az anyag viselkedését külső feszültség hatására. Laboratóriumunkban olyan módon is sikerült eredményesen javítanunk egy anyag mechanikai tulajdonságait,

* Tel.: +36 1 463 2479; e-mail: tatraeljai.dora@vbk.bme.hu

hogy megváltoztattuk az anyagban végbemenő meghatározó tönkremeneteli folyamatot².

3. Természetes alapú polimer módosítása további komponensekkel

A politejsav (PLA) egy olyan termoplasztikus poliészter, amely megfelelő mechanikai tulajdonságainak és a biokompatibilitásának köszönhetően az egyik legígéretesebb természetes alapú és egyben biodegradálható polimer. Előállítható fermentált növényi keményítőtől, kukoricakeményítőtől, cukornádból, cukorrépából, de akár mezőgazdasági hulladékból is. A PLA-ból előállított termékek alkalmazásának korlátjai közé tartozik gyenge hőállósága, érzékenysége a nedvességre és ridegsége. Ahhoz, hogy a PLA szerkezeti anyagként is hatékonyan alkalmazható legyen, ütésállóságát jelentősen növelni kell. Ezt megtehetjük szintetikus szál erősítőanyag alkalmazásával, ennek hátránya viszont, hogy a kompozit már nem 100%-ban biodegradálható. Laborunkban eredményesen javítottuk a PLA ütésállóságát szintetikus szerves polivinil-alkohol (PVOH) és polietilén-tereftalát (PET) szálak hozzáadásával úgy, hogy emellett az anyag modulusa is nőtt³.

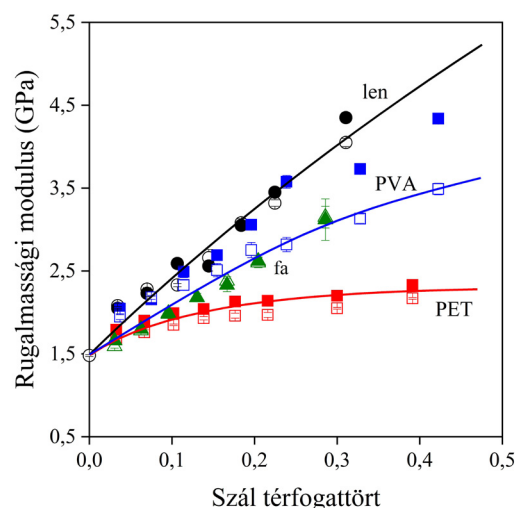
4. Természetes eredetű társítóanyagok alkalmazása

A fenntartható gazdaság koncepciójának jobban megfelelni, ha a polimer keverékekben és kompozitokban alkalmazott társítóanyag is természetes eredetű. A természetes szálak alkalmazásának előnye, hogy gyakran valamilyen mezőgazdasági művelet melléktermékeként keletkeznek, ezért viszonylag olcsók, valamint, hogy a kis sűrűségűük-höz képest jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Sikeresen megvalósítottuk a PLA és a polipropilén (PP) mechanikai tulajdonságainak módosítását több természetes eredetű társítóanyag hozzáadásával, faliszttal, lennel, bagasszal, ligninnel és termoplasztikus keményítővel^{1,3-6}. A **2a. ábrán** jól látszik, hogy a lencsál, illetve a faliszt jelentősen növelte a PP modulusát, hatása vetekszik a szintetikus szálakéval. Ugyanakkor hátrány, hogy a természetes erősítőanyaggal készített kompozitok ütésállósága általában gyenge, még abban az esetben is, ha kémiai kapcsolóanyagot alkalmazunk, hogy erősítsük a töltőanyag és a mátrix közötti kölcsönhatást (**2b. ábra**).

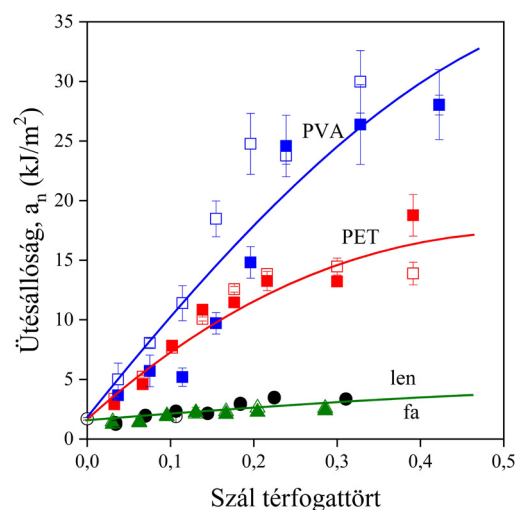
5. Hibrid biokompozitok

Ahogy a **2. ábra** is mutatja, a természetes szálak bár gyakran növelik a kompozit modulusát, az anyag ütésállósága sokszor nem javul kielégítő mértékben. Ilyen esetekben különböző társítóanyagok egyidejű alkalmazása célravezető lehet, így a műanyag több tulajdonságát egyidejűleg tudjuk módosítani. Ebből a megfontolásból fejlesztettünk ki többek között PLA/lignin/poli(butilén-adipát-ko-tereftalát) (PBAT) hibrid keveréket, PP/PET/természetes szál és PP/lignin/lencsál hibrid kompozitokat, amelyekben már hatékonyan alkalmazunk egyrészt megújuló forrásból származó

természetes szálakat a merevség növelésére, másrészt nagyhatékonyságú szintetikus szálakat az ütésállóság növelésére⁷⁻⁹. Ezekben a kompozitokban számos lokális deformációs folyamat megy végbe, amelyek megfelelő összehangolása kedvező tulajdonságkombinációt eredményez. Ezeket a folyamatokat szemlélteti a **3. ábra**, amelyen különböző hibrid kompozitok törési felületéről pásztázó elektronmikroszkóppal készült felvétel látható. A B ábrán jól látható, hogy a jellemző tönkremeneteli mód a szálak kihúzódnása volt, míg a többi ábrán inkább a szálak szakadása figyelhető meg.

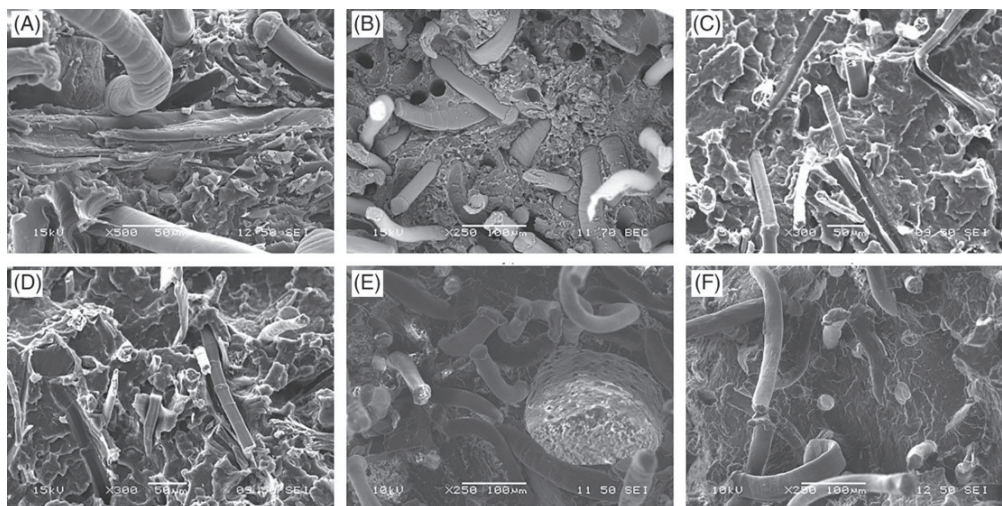


a,



b,

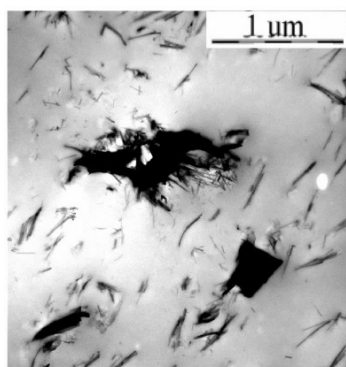
2. Ábra. PVA, PET és len szálal, illetve faliszttal erősített PP merevségének (a) és ütésállóságának (b) változása a hozzáadott erősítőanyag térfogattörtje függvényében (Teli jelölő: kapcsolóanyag hozzáadásával, üres jelölő: kapcsolóanyag nélkül.)⁶.



3. Ábra. Hibrid PP kompozitok törési felületéről pásztázó elektronmikroszkóppal készült felvételek⁷.

6. Természetes eredetű nanoanyagok, nanokompozitok

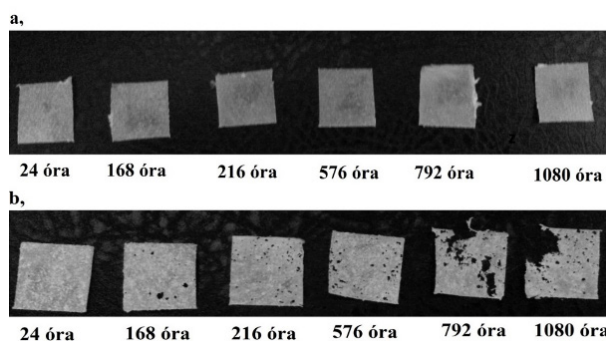
Kompozitok esetén a társítóanyag szemcseméretének csökkenése nagyobb fajlagos felületet és ezzel együtt megnövekedett kölcsönhatást eredményez a töltőanyag és a mátrix között. Ez az egyik tényező, amely a nanokompozitok fejlesztését motiválja. Ugyanakkor a kis szemcseméret növeli a töltő vagy erősítőanyag aggregációs hajlamát, ami viszont az ütésállóság romlásához vezet és korlátozza az anyag alkalmazásának lehetőségeit¹⁰. A kereskedelemben kapható hibrid töltőanyagból képződött aggregátumokról transzmissziós elektronmikroszkóppal készült kép jól mutatja, hogy az aggregátumok mérete messze meghaladja a nanométeres mérettartományt, illetve az egyedi szemcsék méretét (4. ábra). Az aggregáció elkerülésének érdekében a töltőanyag felületkezelésére lehet szükség. Sikeresen állítottunk elő olyan nano-hidroxipatit töltőanyagot tartalmazó PLA alapú csontpótló anyagot, melyben a felületkezelő szer segítségével az aggregációt jelentősen visszaszorítottuk¹¹.



4. Ábra. Transzmissziós elektronmikroszkóppal készült felvétel egy nanotöltőanyag aggregációjáról PP mátrixban¹⁰.

A laboratóriumunkban vizsgált nanoméretű társítóanyagok közé tartoznak a természetes eredetű halloysite nanocsövek (HNT) is. A csövek belső átmérője néhány tíz nanométer, ahová különböző természetes stabilizátorokat juttathatunk,

hogy ez a polimerben társítóanyagként alkalmazva időben elnyújtott, ellenőrzött stabilizáló hatást eredményezzen^{12,13}. A *Burkholderia cepacia* lipázt sikeresen vittük fel halloysite nanocsőhordozó felületére, majd a nanocsövet poli-ε-kaprolakton mátrixhoz adva az enzim a polimeren belül katalizálja annak biodegradációját¹⁴. Ilyen módon a világon először készítettünk önlebomló polimer kompozitot. Az 5. ábra a hordozóra felvitt enzim katalitikus hatását mutatja az enzimet nem tartalmazó polikaprolaktonhoz képest. Míg az utóbbi anyag tömege nem változik az idővel, az önlebomló kompozit tömege folyamatosan csökken.



5. Ábra. Önlebomló polikaprolakton (PCL) film degradációja az enzim katalitikus hatására. Enzim nélkül (a), enzim jelenlétében (b)

Ígéretes, természetes eredetű nanoanyag a kristályos nanocellulóz (CNC). Laborunkban vizsgáltuk a pamutból és lenből kinyert kristályos nanocellulóz kristályokat, szuszpenziókat és a belőlük előállított filmeket. A nanoméretű kristályok aggregációját ultrahangos kezeléssel nagymértékben csökkentettük, így jelentősen növeltük az általunk előállított filmek szakítószilárdságát és merevségét. A filmek szakítószilárdságát glicerín és szorbit lágyítókkkal tovább tudtuk növelni, az így előállított anyag potenciálisan a csomagolóiparban is használható^{15,16}. A természetes polimerekkel kapcsolatos kutatásainkat ugyanebben a különszámban egy másik publikációban mutatjuk be részletesen.

7. Kristályszerkezet és tulajdonság összefüggések modellezése

Sok szó esett a műanyagok szerkezete és tulajdonságai közötti összefüggések megismerésének fontosságáról. Amennyiben van információ a vizsgált anyag szerkezetéről, modellek segítségével meg tudjuk becsülni annak tulajdonságait anélkül, hogy időigényes vizsgálatokat végeznénk. A felállított modellek segítségével, számítógépes szimulációval becsültük a polimert felépítő kristályszerkezetet. A modellek és szimulációk gyakorlati hasznossága jelentős, hiszen segítenek új anyagok tervezésében és felgyorsítják a fejlesztés folyamatát. Polipropilén, polietilén és PET szerkezetének vizsgálata eredményeként szoros összefüggést állapítottunk meg az anyagok kristályos szerkezete és modulusa között¹⁷⁻¹⁹.

8. Biokompatibilis polimerek alkalmazása, enzimatis degradáció

Azontúl, hogy új anyagok fejlesztésekor fontos a polimer eredete és biodegradációja, lényeges szempont a polimerek szervezetre gyakorolt hatása is. A biokompatibilis polimerek fejlesztése lehetőséget ad a műanyagok elterjedésére az orvosi biológiában is. Elektromos szálhúzással PLA, polikaprolakton (PCL) és poli(3-hidroxibutirát) (PHB) biopolimerekből olyan összefüggő pórusszerkezetű vázanyagot, scaffoldot hoztunk létre, amelyen a szövetet kialakító sejtek megtapadnak és szaporodnak, a kialakítandó szövet a vázanyagon három dimenzióban növekszik^{20,21}.

Biokompatibilis PHB felhasználásával sikeresen állítható elő orvosi biológiai implantátum és hatóanyag-leadó mátrix is. A **6. ábrán** nedves szálhúzással előállított szálak láthatók, amelyek alkalmasak vázanyagok készítésére, de ellenőrzött hatóanyagleadó rendszerek előállítására is. Annak érdekében, hogy az alkalmazhatóság előnyeiről és korlátairól megfelelő képet kapjunk, széleskörűen vizsgáltuk a PHB enzimatis degradációjának és hatóanyag-leadásának kinetikáját. Az enzimreakciók leírására hagyományosan alkalmazott Michaelis-Menten modellt úgy módosítottuk, hogy a polimerek heterogén fázisú degradációját, beleértve a PHB alapú eszközöket, megfelelően leírassuk²². A degradáció kinetikáján túl olyan újszerű megközelítést sikerült kidolgoznunk kismólsúlyú adalékok diffúziós koefficiensének meghatározására amorf PHB filmekben, amely segítségével empirikus faktorok nélkül leírhatjuk a hatóanyag-leadás időfüggését²³.



6. Ábra. Nedves szálhúzással előállított PHB szálakról digitális optikai mikroszkóppal készült kép²¹.

A PHB mellett vizsgáltuk a PLA enzimatis degradációjának optimális környezeti paramétereit. A *Proteinase K* enzim katalizálja a PLA biodegradációját. Eredményeink fényt derítettek a folyamatot meghatározó legfontosabb tényezőkre, az enzimkoncentrációra, a hőmérsékletre és a pH-ra²⁴. A PHB degradációjára kidolgozott módosított kinetikai modellt sikeresen alkalmaztuk a PLA enzimatis degradációjának leírására. Az összegyűlt tapasztalatok alapján biodegradálható PLA/CNC kompozitokat állítottunk elő²⁵.

Egy Európai Unió projekt keretében olyan természetes fehérje, illetve szintetikus poliaminosav nanorészecskéket fejlesztünk, amelyek lehetővé teszik a vízben rosszul oldódó gyógyszerhatóanyagok oldatba vitelét, célba juttatását és késleltetett felszívódását. Mindehhez zöld kémiai eljárásokat alkalmazunk: kukoricafelhérből, illetve aminosavakból kiindulva deszolvációval, vizes közegben hozunk létre nanorészecskéket, amelyeket különböző eredetű és szerkezetű poliszacharidokkal (pektin, alginát, karragén) vonunk be, majd stabilitásuk növelése érdekében enzimesen térhálósítunk. A nanorészecskék jellemzése során, azok méreteleszlása és hatóanyagleadási jellemzői mellett, kiemelt figyelmet fordítunk az általuk kiváltott immunválasz in vitro vizsgálatára és mérséklésére.

9. Kémiai újrahasznosítás

Térhálós szerkezetük miatt egyszerű fizikai újrahasznosítással nem lehetséges feldolgozni a poliuretán párnák és matracok hulladékát. Egy török-magyar Európai Unió projekt keretében lágy poliuretán habok kémiai lebontásával, szolvólízissel foglalkozunk (ld. **7. ábra**). Célunk a bomlástermékek újrahasznosítási lehetőségeinek felderítése. Ezen túl kutatócsoportunk részt vesz PET és epoxigyanta környezetbarát kémiai lebontásában is. A lebontást szuperkritikus állapotú vízzel végezzük, amelynek előnye a rendkívül gyors, majdnem pillanatszerű reakció.



7. Ábra. Poliuretán habok glikolízissel történő bontásának termékei.

10. Természetes stabilizátorok

A polimerek, feldolgozásuk során magas hőmérsékleten oxigénnel reagálhatnak, ami a láncok szerkezetének megváltozásához és a termék tulajdonságainak romlásához vezethet. A degradáció mértékének csökkentésére az előállítás, illetve feldolgozás során a polimerhez stabilizátort adnak. Aggodalomra adhat okot az iparban leggyakrabban alkalmazott stabilizátorokkal kapcsolatban, a szintetikus fenolos antioxidánsok reakciótermékeinek esetlegesen negatív hatása az élő szervezetekre. Kutatócsoportunk olyan természetes eredetű modern stabilizátorok fejlesztésén dolgozik, amelyek nem károsítják a környezetet, illetve az élő szervezetet, ha kikerülnek az anyagból. Ilyen antioxidánsok közé tartoznak például a kurkumin, amely elterjedten alkalmazott fűszer, élelmiszeripari segédanyag és a természetgyógyászatban alkalmazott anyag (ld. **8. ábra**), a dihidromiricetin, a kvercetin, a szilimarín, a t-resveratrol és a rutin^{26–30}. Ezek az antioxidánsok megtalálhatók különböző gyümölcsökben, zöldségekben, levelekben és magokban. Sikeresen alkalmaztuk őket polimerömlédek stabilizálására kimutatva, hogy sok esetben hatékonyabbak, mint a hagyományosan alkalmazott ipari antioxidánsok. A stabilizátorok mellőzése, illetve nem megfelelő stabilizátorok alkalmazása komoly akadály az újrahasznosított műanyagok elterjedésében. Laboratóriumunkban ezért vizsgáljuk újrahasznosított polimer granulátum utólagos stabilizálásának lehetőségeit, ezzel támogatva a körkörös gazdaság előremozdítását.



8. Ábra. A kurkumin természetes eredete, a kurkuma.

11. A kutatáson túl

Azontúl, hogy csoportunk magas színvonalú oktatási és kutatási tevékenységet folytat a műanyagok jellemzésével, feldolgozásával, fejlesztésével és alkalmazásával kapcsolatban, különböző konferenciák, workshopok szervezésével és platformok létesítésével nemzetközi szinten is részt vállalunk a fenntartható gazdaság kutatási irányzatainak kijelölésében és egy nemzetközi szintű összefogás kialakításában. Minden második évben megszervezzük Magyarországon a BiPoCo konferenciát (International Conference on Bio-based Polymers and Composites), amelyen a világ minden tájáról érkező, nemzetközileg elismert előadók bemutatják az aktuális kutatási irányzatokat és lehetőségeket a biopolimerek és biokompozitok, valamint a biomassa alapú gazdaság területén. A **9. ábrán** a legutóbbi, 2024 szeptember elején rendezett konferencia résztvevőiről készült csoportkép látható. Ezen túl a konferencia lehetőséget teremt a

konstruktív párbeszédre a területen érdekelt kutatók és ipari szereplők számára. A csoport által szervezett BIOEAST Kezdeményezés Közép- és Kelet-Európa országaiban támogatja a biomassa termelését és feldolgozását érintő szakpolitikák tudásalapú összekapcsolását, valamint a kutatási és innovációs kapacitások erősítését.



9. Ábra. A 2024-ben Esztergomban megrendezett BiPoCo konferencia résztvevői.

Hivatkozások

- Várdai, R.; Lummerstorfer, T.; Pretschuh, C.; Jerabek, M.; Gahleitner, M.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B. *Compos Part A Appl Sci Manuf* **2020**, *133*, 105895. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105895>
- Sudár, A.; Renner, K.; Móczó, J.; Lummerstorfer, T.; Burgstaller, C.; Jerabek, M.; Gahleitner, M.; Doshev, P.; Pukánszky, B. *Compos Struct* **2016**, *141*, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.031>
- Ferdinánd, M.; Várdai, R.; Móczó, J.; Pukánszky, B. *Eng Fract Mech* **2023**, *277*, 108950. <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2022.108950>
- Kun, D.; Pukánszky, B. *Eur Polym J* **2017**, *93*, 618–641. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.04.035>
- Bartos, A.; Anggono, J.; Farkas, A. E.; Kun, D.; Soetaredjo, F. E.; Móczó, J.; Antoni, Purwaningsih, H.; Pukánszky, B. *Polym Test* **2020**, *88*, 106549. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106549>
- Várdai, R.; Ferdinánd, M.; Lummerstorfer, T.; Pretschuh, C.; Jerabek, M.; Gahleitner, M.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B. *Polym Int* **2021**, *70* (1), 145–153. <https://doi.org/10.1002/pi.6105>
- Várdai, R.; Lummerstorfer, T.; Pretschuh, C.; Jerabek, M.; Gahleitner, M.; Bartos, A.; Móczó, J.; Anggono, J.; Pukánszky, B. *Polym Adv Technol* **2021**, *32* (6), 2499–2507. <https://doi.org/10.1002/pat.5280>
- Pregi, E.; Faludi, G.; Kun, D.; Móczó, J.; Pukánszky, B. *Ind Crops Prod* **2022**, *182*, 114890. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114890>
- Pregi, E.; Romsics, I.; Várdai, R.; Pukánszky, B. *Polymers (Basel)* **2023**, *15* (15), 3237. <https://doi.org/10.3390/polym15153237>
- Ferdinánd, M.; Várdai, R.; Móczó, J.; Pukánszky, B. *Polym Test* **2023**, *117*, 107840. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107840>
- Ur, A.; Plachi, D.; Varga, V.; Hornyák, I.; Románszki, L.; Slouf, M.; Hegyesi, N.; Móczó, J.; Kardos, D.; Tátraaljai, D.; Pukánszky, B. *Emergent Mater* **2025**, 1–13.
- Hári, J.; Gyürki, Á.; Sárközi, M.; Földes, E.; Pukánszky, B. *J Colloid Interface Sci* **2016**, *462*, 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.09.054>
- Hári, J.; Polyák, P.; Mester, D.; Mičušik, M.; Omastová, M.; Kállay, M.; Pukánszky, B. *Appl Clay Sci* **2016**, *132–133*, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.06.001>

14. Hegyesi, N.; Hodosi, E.; Polyák, P.; Faludi, G.; Balogh-Weiser, D.; Pukánszky, B. *Colloids Surf B Biointerfaces* **2020**, *186*.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110678>
15. Csiszár, E.; Nagy, S. *Carbohydr Polym* **2017**, *174*, 740–749.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.06.103>
16. Csiszar, E.; Kalic, P.; Kobol, A.; Ferreira, E. D. P. *Ultrason Sonochem* **2016**, *31*, 473–480.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.028>
17. Zarbali, A.; Djaffar, I.; Menyhárd, A. *Heliyon* **2024**, *10* (4), e26122.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26122>
18. Menyhárd, A.; Suba, P.; László, Z.; Fekete, H. M.; Mester, O.; Horváth, Z.; Vörös, G.; Varga, J.; Móczó, J. *Express Polym Lett* **2015**, *9* (3), 308–320.
<https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2015.28>
19. Zarbali, A.; Yossier, Y.; Menyhárd, A. *J Therm Anal Calorim* **2024**, *150* (1), 167–173.
<https://doi.org/10.1007/s10973-024-13759-4>
20. Nagy, O.; Kirschweng, B.; Imre, B.; Pukánszky, B. *Műanyag- és Gumiipari Évkönyv* **2016**, 86–93.
21. Polyák, P.; Bartha, K.; Pukánszky, B. *Materials Science and Engineering: C* **2020**, *114*, 111026.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111026>
22. Polyák, P.; Dohovits, E.; Nagy, G. N.; Vértessy, B. G.; Vörös, G.; Pukánszky, B. *Int J Biol Macromol* **2018**, *112*, 156–162.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.104>
23. Polyák, P.; Szemerszki, D.; Benke, H. C.; Pukánszky, B. *Polym Test* **2017**, *63*, 342–348.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.037>
24. Cui, L.; Wang, X.; Szarka, G.; Hegyesi, N.; Wang, Y.; Sui, X.; Pukánszky, B. *Int J Biol Macromol* **2022**, *209*, 1703–1709.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.121>
25. Hegyesi, N.; Zhang, Y.; Kohári, A.; Polyák, P.; Sui, X.; Pukánszky, B. *Ind Crops Prod* **2019**, *141*, 111799.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111799>
26. Tátraaljai, D.; Kirschweng, B.; Kovács, J.; Földes, E.; Pukánszky, B. *Eur Polym J* **2013**, *49* (6), 1196–1203.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.02.018>
27. Tátraaljai, D.; Földes, E.; Pukánszky, B. *Polym Degrad Stab* **2014**, *102* (1), 41–48.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.02.010>
28. Kirschweng, B.; Bencze, K.; Sárközi, M.; Hégely, B.; Samu, G.; Hári, J.; Tátraaljai, D.; Földes, E.; Kállay, M.; Pukánszky, B. *Polym Degrad Stab* **2016**, *133*, 192–200.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.08.016>
29. Kirschweng, B.; Tilinger, D. M.; Hégely, B.; Samu, G.; Tátraaljai, D.; Földes, E.; Pukánszky, B. *Eur Polym J* **2018**, *103*, 228–237.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.04.016>
30. Takács, K.; Németh, M. Á.; Renkecz, T.; Tátraaljai, D.; Pukánszky, B. *Polym Degrad Stab* **2024**, *230*, 111046.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.111046>

Research activity at the Laboratory of Plastics and Rubber Technology

The Laboratory of Plastics and Rubber Technology (MGL) is a group of the Department of Physical Chemistry and Materials Science, which mainly teaches students of the Faculty of Chemical Technology and Biotechnology at BME, training qualified engineers for the plastics industry. Our laboratory works in close collaboration with the Polymer Chemistry and Physics Research Group of the HUN-REN Research Centre for Natural Sciences. An important part of our work is the cooperation with national and international industrial companies, where we work on solving specific industrial problems. In addition to teaching and industrial activities, the group has been carrying out high-quality basic and applied research for decades, with a focus over the last 10 years on the research and development of materials and solutions that

can be integrated into the circular economy. We actively explore the possibilities of the chemical recycling of various plastics, such as PET and polyurethane, and the use of natural-based stabilizers. Much of our research focuses on naturally derived materials. We have successfully developed hybrid biocomposites and natural-based nanomaterials. Our laboratory has also pioneered the development of biocompatible and biodegradable materials for biomedical applications. In addition to our high-quality teaching and research activities, our group is also involved in setting research directions for the sustainable economy and building an international network of connections by organizing conferences, workshops, and platforms at the international level.